

运用遗传算法综合稀疏阵列

王玲玲, 方大纲

(南京理工大学毫米波技术研究所, 江苏南京 210094)

摘要: 本文运用遗传算法(GA)综合稀疏阵列(单元从规则栅格中稀疏)时,不仅优化单元间距,而且将单元激励也作为优化变量,从而提供了更多的自由度来控制稀疏阵列的性能。其中,单元的幅相加权在数字波束形成天线中可以通过数字方法实现。由于稀疏阵列间隔是栅格的整数倍,因此采用了GA结合快速傅立叶变换的方法加快阵列方向图的评估,提高了优化效率。

关键词: 稀疏阵列; 遗传算法(GA); 快速傅立叶变换(FFT); 数字波束形成天线

中图分类号: TN821; TN957. 2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2135-04

Genetic Algorithm for the Synthesis of Thinned Array

WANG Ling-ling, FANG Da-gang

(Millimeter Wave Technique Laboratory, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: Genetic algorithm (GA) is used for the synthesis of thinned arrays (whose elements are thinned from the uniform grid), which uses not only element spacings but also element excitation as variables, so it provides more degree of freedom to control the characters of thinned arrays. The weighing of antenna element can be realized in digital beamforming antenna systems through digital signal processing. Because the spacings of thinned array are the integral times of grid, so the approach based on a combination of GA and fast Fourier transform (FFT) is used to speed up the evaluation of array pattern so as to save the calculation time dramatically and improve the optimization efficiency.

Key words: thinned arrays; genetic algorithm (GA); fast Fourier transform (FFT); digital beamforming antenna

1 引言

在许多工程应用中,天线阵列要求有窄的扫描波束,而不要求有相应的增益。例如抗环境干扰的卫星接收天线、高频地面雷达天线和射电天文中的干涉阵列等等。阵列波束宽度与口径的最大尺寸有关,增益与照射口径面积有关,因此可以采用稀疏阵列(即从规则的栅格中抽去天线单元或接匹配负载)的方法构造出一个降低了增益的高方向性天线阵列,以较少的单元数达到技术指标(如波束宽度等),从而大大降低生产成本^[1]。阵列的周期性变稀会使方向图出现非常高的副瓣,这可以通过破坏非周期的方法加以控制,从而出现了许多非周期阵列的设计方法。Skolnik 采用密度锥削的方法^[2],使单元密度与一个常规满阵的口径照射幅度成正比,即单元位置的选择是通过出现加权值为 1 或 0 的单元概率与满阵锥削度成正比的统计法而完成的。这种方法简单很容易应用于大型阵列的设计中,但它不能保证副瓣峰值电平被抑制到低于给定的电平。动态编程法^[3]是一种控制副瓣峰值电平的好方法,可以应用于大型阵列,但是极易陷入局部最小值。许多传统的优化方法(例如 Powell 方法、共轭梯度法等)不适合优化大量参数或离散参数。遗传算法(Genetic algorithm,简称 GA)是一种全局

性的优化方法,不仅能避免计算搜索过程陷入局部最优,而且在所定义的适应度函数非连续、不规则和伴有噪声的情况下也能以极大的概率找到全局最优解,非常适用于大规模阵列天线的处理^[4]。Haupt^[5]采用 GA 优化稀疏阵,阵列单元是均匀照射激励,稀疏是从规则的栅格中抽去天线单元或接匹配负载,从而得到比较低的副瓣电平。文献[6,7]采用量化幅度分布的稀疏方法,把阵列排成被每一量化加权照射的区域,然后利用阵列的变稀来降低在只用量化时可能产生的副瓣。这个“变稀”规则在单个量化电平时就是 Skolnik 方法。这种方法说明通过统计稀疏结合离散幅度量化加权可以降低副瓣电平。同时也说明,稀疏阵列的优化变量可以包括天线单元位置、单元激励(幅度和相位),从而提供了更多的自由度来控制稀疏天线的特性。其中,单元激励可以通过仔细设计馈电网络来实现所求的非均匀激励;在数字波束形成天线中,天线单元的幅相加权可以很容易的通过数字方法实现。

本文利用 GA 优化一个稀疏阵列,首先将天线单元位置作为优化变量降低一个均匀照射的满足给定阵列布满率的稀疏阵的副瓣电平。由于阵列间隔是离散的数值,到达一定的程度后,副瓣电平很难再改进。这时,再将其单元的激励作为优化变量可以再进一步降低副瓣电平。由于稀疏阵列间隔是栅

格的整数倍,因此采用了 GA 结合快速傅立叶变换(FFT)的方法加快阵列方向图的评估,从而大大节省了计算时间,提高了优化效率。

2 遗传算法优化天线阵列的基本原理

2.1 遗传算法简介

遗传算法是由美国密执根(Michigan)大学的 Holland 教授于 1975 年首先提出的一种全局性优化方法,具有鲁棒性强、适于并行处理以及通用等显著特点,已经开始在电磁场和微波领域得到广泛应用^[4,9,10]。GA 是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程的计算模型,一般是从一个初始群体出发(通常采用随机生成序列),根据适应度函数评估所有个体的优劣,进行选择(使群体中优秀的个体有更多的机会传给下一代)、交叉(使群体内个体之间的信息相互交换)和变异(在群体中引入新的变种确保群体中信息的多样性)等遗传操作,使群体一代一代地进化,直到满足给定的精度或是到达最大的遗传代数。

GA 中包含了 5 个基本要素:(a) 参数编码;(b) 初始群体的建立;(c) 适应度函数的构造;(d) 遗传操作(选择、交叉和变异)的设计;(e) 控制参数的设定^[11]。其中优化变量的编码方式有很多种,例如二进制位编码、格雷编码、实值编码等等。采用不同的编码方式,对应于不同的遗传操作。

2.2 GA 优化天线阵列的适应度函数的构造

对于一个 N 单元等间距的阵列,它的阵列方向图可写为^[12]

$$S(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j n \pi d_x (\cos \theta - \cos \theta_0)} \text{elpat}(n) \quad (1)$$

其中, N 是天线单元数目, I_n 和 ϕ_n 分别是第 n 个单元激励的幅度和相位, d_x 是单元间距, $\text{elpat}(n)$ 是单元方向图, θ 和 θ_0 分别是角度变量和主波束指向位置。如果阵列单元是相同的,则根据方向图乘积定理,阵列方向图就是单元方向图和阵因子的乘积,

$$S(\theta) = \text{elpat} \cdot AF(\theta) \quad (2)$$

在 GA 中,将阵列天线单元位置、单元电流的幅度值或相位值作为待优化变量,编码形成基因,基因再组合成染色体,也就是个体,若干个(即群体规模)个体就组成群体。适应度函数根据具体问题的优化目标要求构造,使阵列方向图符合某种给定的曲线形状或者某个点或者区域落在规定的数值范围内(如形成零陷、达到给定的副瓣电平)等等,它的形式通常为^[4]:

$$\text{fitness} = \frac{a}{a + be} \quad (3)$$

或
$$\text{fitness} = a + be \quad (4)$$

其中, a 和 b 是根据具体问题选定的加权系数, e 是采样点数的误差,这个误差可以是绝对误差、相对误差或者是均方差。

2.3 GA 结合 FFT 优化天线阵列的原理

群体在进化过程中要反复计算方向图函数的采样点来评估个体的优劣。如果能够降低计算方向图的时间就能够减少评估个体的时间,从而大大提高 GA 的计算速度。对于一个规

则栅格的阵列天线,这可以通过离散傅立叶变换(DFT)来计算,从而运用快速傅立叶变换来实现。令 $p = kd_x \cos \theta \times N/2$, $I_n = I_n e^{j n \pi d_x \cos \theta_0}$, 则式(2)中天线的阵因子可写为

$$\sum_{n=1}^N I_n e^{-j(n-1)(2/N)p} = AF(p) \quad (5)$$

DFT 的定义为:

$$X(p) = \sum_{n=1}^N x(n) e^{-j2\pi(p-1)(n-1)/N} \quad (6)$$

这样,根据具体的问题,将 (θ) 域中的方向图特性映射到 (p) 域中,就可以在 (p) 域中进行优化。虽然 (p) 域是离散的,但是 (θ) 域是连续的,因此总可以找到两者对应的值,即

$$p = kd_x \cos \theta \times N/2 \quad (7)$$

其中, $p = 1, 2, \dots, N$ 。这样通过(7)的对应关系,GA 优化方向图时就可以在 (p) 域中进行,得到的结果就是所要的电流分布,不需要再进行任何的变换。如果天线单元是有方向性的,则将 (θ) 域中的天线单元方向图事先转换成 (p) 域中的方向图,在适应度函数中与阵因子 $AF(p)$ 相乘就可以得到阵列方向图。这样, (p) 域中天线的方向图计算时间就可以大大减少。在 (θ) 域中方向图的计算时间正比于 N^2 ,而库利-图基的 FFT 计算时间正比于 $N \log_2 N$ 。还有很多 FFT 算法,譬如分裂基 FFT,维格勒傅立叶变换算法等等^[13]。计算的时候究竟快多少,取决于问题的点数、FFT 的细节和所使用的卷积程序。同样,这种方法也可以用于平面阵列的优化。如果电流分布是可分离型分布的情况,对两维分别采用一维 FFT 计算,再利用方向图乘积定理得到阵列方向图;如果是不可分离型分布的情况,采用二维 FFT 计算^[8]。

3 用 GA 优化一个稀疏阵列

稀疏阵列是从规则的栅格中稀疏,因此单元是否被激励可以用一个二进制位来表示,分别取 0 或 1,我们称为标志位。当取 1 时,单元存在;当取 0 时,单元稀疏。如果将单元激励作为 GA 的优化变量,采用实值编码,和标志位组成染色体,就涉及到进化过程中遗传操作的困难;如果它采用二进制编码,和标志位一起组成染色体进行进化,仿真表明这样收敛速度极慢,优化效果不理想。如何有效地同时卷入标志位和激励作为变量是我们要进一步深入研究的问题,这里我们采取一种 2 步实施的方案,先利用 GA 可以优化出一个均匀馈电的规则稀疏阵列,再利用 GA 优化这个稀疏阵列来进一步降低它的副瓣电平。由于稀疏阵列单元是按栅格抽取的,采用遗传算法优化时,就可以采用 GA 结合 FFT 的方法,大大节省了个体评估时间,提高了优化速度。

3.1 均匀馈电的稀疏阵列

在文献[5]中,Haupt 就用 GA 优化了一个 200 阵元的均匀馈电的中心对称稀疏阵列,适应度函数为

$$FF(u) = \max \left| 2 \sum_{n=1}^{N/2} a_n \frac{\cos(2\pi ndu + \phi_n)}{FF_{\max}} \text{elpat}(u) \right|, \frac{c_0}{2Nd} \leq u \leq 1 \quad (8)$$

其中, N 是天线单元数目, a_n 是天线标志位, d 是栅格间距, u

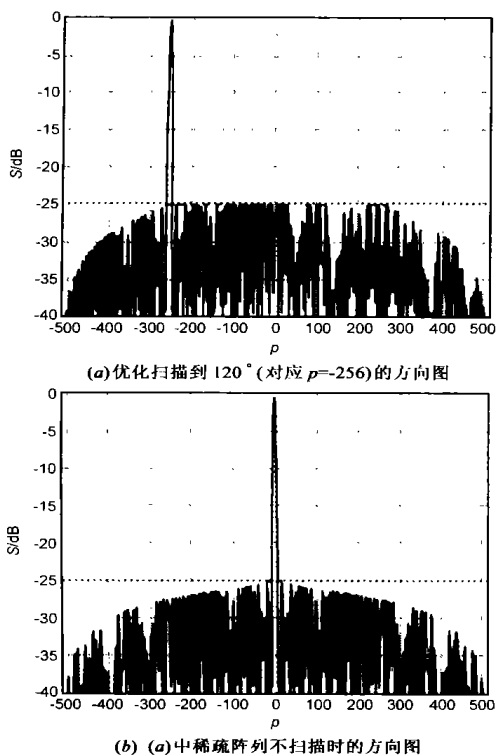


图4 采用 GA 结合 FFT 优化稀疏阵列幅相得到的阵列方向图控制稀疏阵列的性能。这种分 2 步优化的方案,应用性很强。如果第一步中已满足天线系统要求,则不再优化幅相;如果第一步中不满足天线系统要求,则再优化幅相进一步降低副瓣电平。同时,在两步优化中都采用了 GA 结合 FFT 的方法,大大加快了 GA 的优化速度,提高了计算效率,在工程应用中具有更大的应用价值。

参考文献:

- [1] MAILLOUX R J. Phased Array Antenna Handbook [M]. Boston: Artech House, 1994. 91 - 110.
- [2] SKOLNIK M I, SHERMAN III J W, et al. Statistically designed density tapered arrays [J]. IEEE Trans, 1964, AP-12: 408 - 417.
- [3] SKOLNIK M I, et al. Dynamic programming applied to unequally spaced array [J]. IEEE Trans, 1964, AP-12(1): 35 - 43.
- [4] SAMII Y R, MICHELSEN E. Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms [M]. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [5] HAUPT R L. Thinned arrays using genetic algorithms [J]. IEEE Trans, 1994, AP-42(7): 993 - 999.
- [6] MAILLOUX R J, COHEN E. Statistically thinned arrays with quantized

element weights [J]. IEEE Trans, 1991, AP-39(4): 436 - 447.

- [7] NUMAZAKI T, MANO S, et al. An improved thinning method for density tapering of planar array antennas [J]. IEEE Trans, 1987, AP-35(9): 1066 - 1070.
- [8] WANG L, FANG D G, SHENG W X. Combination of genetic algorithm (GA) and fast Fourier transform (FFT) for synthesis of arrays [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 37(1): 56 - 59.
- [9] HAUPT R L. An introduction to genetic algorithms for electromagnetics [J]. IEEE Antennas Propagat. Mag., 1995, 37(2): 7 - 15.
- [10] WEI D, MICHELSEN E. Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: A review [J]. IEEE Trans, 1997, AP-45(3): 343 - 353.
- [11] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 王东生. 遗传算法及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996. 28 - 98.
- [12] ELLIOTT R S. Antenna Theory and Design [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1981.
- [13] MADISETTI V K, WILLIAMS D B. Digital Signal Processing Handbook [M]. Part III-7: Fast Fourier Transforms: A Tutorial Review and a State of the art. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [14] YEO B K, LU Y. Array failure correction with a genetic algorithm [J]. IEEE Trans, 1999, AP-47(5): 823 - 828.

作者简介:



王玲玲 女, 1978 年 4 月出生于江苏, 2000 年本科毕业于南京理工大学通信工程系, 同年免试直接攻读本校电磁场与微波技术专业博士学位, 主要从事数字波束形成、天线及阵列的分析和设计、电磁场数值计算和优化算法等方面的工作。



方大纲 男, 1937 年 6 月出生于上海, 南京理工大学教授, 博导, IEEE Fellow, 中国电子学会会员, IEEE Trans MTT 杂志和《电波科学学报》编委, 《微波学报》副主编, 1987 年起曾任加拿大、香港六所大学访问教授, 并曾任五个国际会议的国际顾问委员会委员等学术职务。出版教材、专著各一本, 发表论文 300 多篇, 其国际杂志 40 多篇, 国际会议大会和分组特邀报告 2 篇, 所发表论文已被国际杂志他引 300 多次, 成果经鉴定均达国际先进或国内领先水平, 并获国家教委和省部级以上科技进步一、二、三等奖共 7 项, 发明专利 2 项和实用新型专利 1 项, 主要研究方向为计算电磁学、微带天线和电路、雷达目标特性、微波成像、智能天线等。